



# Réduction du PAPR dans les modulations OFDM basée sur la méthode TR avec prise en compte de l'intervalle de garde

Hermann Sohtsinda, Smail Bachir, Clency Perrine, Claude Duvanaud

## ► To cite this version:

Hermann Sohtsinda, Smail Bachir, Clency Perrine, Claude Duvanaud. Réduction du PAPR dans les modulations OFDM basée sur la méthode TR avec prise en compte de l'intervalle de garde. 19<sup>èmes</sup> Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01212177

**HAL Id: hal-01212177**

**<https://hal.science/hal-01212177>**

Submitted on 6 Oct 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Réduction du PAPR dans les modulations OFDM basée sur la méthode TR avec prise en compte de l'intervalle de garde

H. Sohtsinda, S. Bachir, C. Perrine, C. Duvanaud

Laboratoire XLIM-SIC, UMR CNRS 7252, Université de Poitiers, Bât. SP2MI, Téléport 2, Bvd Marie et Pierre Curie, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France  
hermann.sohtsinda@univ-poitiers.fr

**Résumé** Cet article présente une nouvelle stratégie de réduction du PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) dans les modulations multiporteuses, basée sur une modification mineure de l'architecture de l'émetteur en vue d'améliorer les performances de la méthode TRNS (Tone Reservation Using Null Subcarriers). Classiquement, cette dernière utilise les Sous-Porteuses Nulles (SPN) disponibles dans les standards de télécommunications afin de réduire le PAPR. Cependant, les performances de cette méthode sont limitées en raison du nombre réduit des SPN. La stratégie proposée ici permet d'améliorer le gain de réduction du PAPR en associant les échantillons de l'Intervalle de Garde (IG) aux SPN, tout en maintenant la même qualité de service. Des simulations en utilisant le standard IEEE 802.11a et en présence d'un canal gaussien et d'un canal multi-trajets montrent les possibilités offertes par cette méthode en termes de réduction du PAPR et de qualité de service.

### 1. Introduction

La modulation OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) offre de nombreux avantages comme la robustesse face aux canaux sélectifs en fréquence et la simplicité d'implémentation. Cependant, en raison d'importantes fluctuations d'amplitudes, les signaux modulés OFDM souffrent des nonlinéarités des circuits tels que les amplificateurs de puissance. Ceci ayant des conséquences sur la qualité des transmissions comme la génération des produits d'intermodulations, les interférences, les remontées spectrales, etc. Une solution à ce problème consisterait à utiliser un amplificateur avec un fort recul en puissance. Cependant, cette solution détériore le rendement énergétique des amplificateurs à l'émission. D'autres solutions proposent de réduire les fluctuations d'amplitude du signal OFDM. Plusieurs techniques de réduction du PAPR ont été proposées telles que les méthodes Clipping [1], PTS (Partial Transmit Sequence) [2], ou Selective Mapping (SLM) [2]. Cependant, ces méthodes ne garantissent pas la compatibilité descendante.

La méthode TRNS (Tone Reservation using Null-Subcarriers) génère un signal de correction [3] en utilisant les sous-porteuses nulles ou libres (SPN) des standards,

ce qui garantit la compatibilité descendante, c'est-à-dire, qu'elle est sans conséquence sur le récepteur. Cependant, les performances de la méthode TRNS sont limitées en raison du nombre réduit de SPN disponibles. Dans cet article, nous proposons d'adjoindre les échantillons de l'Intervalle de Garde (IG) dans le processus d'optimisation de la méthode TRNS, ce qui constituera un degré de liberté supplémentaire pour l'amélioration des résultats. En effet, dans les systèmes OFDM, l'IG permet d'éviter les Interférences Entre Symboles (IES) et les Interférences Entre Canaux (IEC). Ce signal est toutefois supprimé à la réception sans aucune autre forme d'utilisation. Les performances de la méthode développée, que nous appellerons *Hybrid Tone Reservation* (HTR), qui propose d'exploiter l'IG pour la réduction du PAPR seront évaluées en termes de Taux d'Erreurs Binaire (TEB) et d'EVM (Error Vector Magnitude) sur un canal gaussien et un canal multitrajets.

**Notation :** Dans cet article, les vecteurs et matrices sont représentés en lettres minuscules dans le domaine temporel et en lettres majuscules dans le domaine fréquentiel.

### 2. Technique d'Inclusion de l'Intervalle de Garde dans la méthode TRNS

#### 2.a. Systèmes OFDM

Un symbole OFDM noté  $x$  est une combinaison de  $N$  symboles modulés  $X_i, i = 0, \dots, N-1$  et portés par  $N$  sous-porteuses orthogonales. Un échantillon  $x_n$  de ce signal s'écrit :

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X_i e^{j \frac{2\pi n i}{N}} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

Au niveau de l'émetteur, l'enveloppe complexe du signal  $x$  est obtenue en réalisant la transformation inverse de Fourier (IFFT) telle que :

$$x = Q \cdot X \quad (2)$$

où  $Q$  représente la matrice d'IFFT de taille  $N \times N$  et  $X$  représente le vecteur des  $N$  symboles modulés. Le PAPR permet de quantifier les fluctuations d'un symbole OFDM comme suit :

$$\text{PAPR}_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |x_n|^2}{E[|x_n|^2]} \right) \quad (3)$$

où  $E[|x_n|^2]$  représente la puissance moyenne du signal.

### 2.b. Utilisation de l'IG pour la réduction du PAPR

Habituellement, les techniques Cyclic Prefix (CP) ou Zero-Padding (ZP) sont utilisées pour générer les échantillons de l'IG après l'IFFT. Afin de les inclure dans le processus de réduction du PAPR, nous proposons une réécriture de la relation (2) permettant de lier le signal émis  $y$  aux données  $x$  et au signal  $w$  qui représente les  $M$  échantillons de l'IG, tel que :

$$y = x + w = Q \cdot X + H_{21} \cdot W \quad (4)$$

où  $y$  est le vecteur du signal émis de taille  $P \times 1$  tel que  $P = N + M$ .  $H_{21}$  est une matrice pseudo-aléatoire de taille  $N \times M$  établie entre l'émetteur et le récepteur.

La généralisation de cette relation peut être décrite matriciellement comme suit :

$$y = \begin{bmatrix} w \\ x \end{bmatrix} = G \cdot Y \quad (5)$$

où  $G = \begin{bmatrix} I_M & 0 \\ H_{21} & Q \end{bmatrix}$  est une matrice de taille  $P \times P$  et  $I_M$  est la matrice identité de taille  $M \times M$ .

### 2.c. Principe de l'algorithme HTR

L'objectif de l'algorithme HTR est la recherche des valeurs optimales du signal de correction  $c$  à ajouter au signal de données  $y$  tel que :

$$y + c = G \cdot (Y + C) \quad (6)$$

Comme le montre la figure 1, le principe de la méthode HTR consiste à compléter le signal de correction issu des sous-porteuses nulles par le signal de l'intervalle de garde tel que :

$$\begin{aligned} y + c &= y + c^{SPN} + c^{GI} \\ &= y + G^{SPN} \cdot C + G^{GI} \cdot C \end{aligned} \quad (7)$$

où  $c^{SPN}$  et  $c^{GI}$  sont les signaux de correction issus respectivement des  $L$  sous-porteuses nulles et des  $M$  échantillons de l'intervalle de garde. Les matrices  $G^{SPN}$  et  $G^{GI}$  de taille  $P \times P$  représentent respectivement les restrictions de la matrice  $G$  aux sous-porteuses nulles et à l'intervalle de garde. Le vecteur de correction  $C$  de taille  $P \times 1$  résulte de la combinaison des vecteurs  $C^{SPN}$  et  $C^{GI}$ .

La méthode HTR recherche le signal de correction optimal en se basant sur la solution d'optimisation d'un problème convexe non-linéaire présenté dans [3]. Étant donné un seuil prédéfini  $A$ , les valeurs optimales des deux vecteurs de corrections sont obtenues en minimisant un critère composite  $J$  permettant l'adjonction de l'IG dans la recherche telle que :

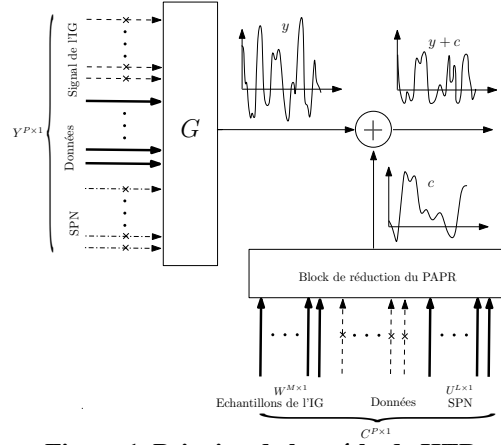


Figure 1. Principe de la méthode HTR

$$\begin{aligned} J &= J^{SPN} + \alpha \cdot J^{GI} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{|y_i+c|>A} (\varepsilon_i^{SPN})^2 + \alpha \cdot \frac{1}{2} (\varepsilon_i^{GI})^2 \end{aligned} \quad (8)$$

où  $\varepsilon_i^{SPN} = |y_i + c_i^{SPN}| - A$  et  $\varepsilon_i^{GI} = |y_i + c_i^{GI}| - A$  représentent les erreurs entre le signal corrigé et le seuil prédéfini  $A$  relativement aux signaux de correction  $c_i^{SPN}$  et  $c_i^{GI}$ . De même,  $J^{SPN}$  et  $J^{GI}$  sont les deux fonctions de coût liées respectivement à  $C$  et  $W$ . Le paramètre  $\alpha$  compris entre 0 et 1 permet de régler le niveau du signal de l'intervalle de garde afin d'éviter la détérioration de la qualité de transmission en présence des canaux multi-trajets.

### 2.d. Application au standard IEEE 802.11a

La figure 2 présente le principe des méthodes TRNS et HTR avec comme exemple d'application le standard WLAN-IEEE 802.11a ( $N = 64$  sous-porteuses par symbole, 12 sous-porteuses nulles et  $M = 16$  échantillons pour l'IG).

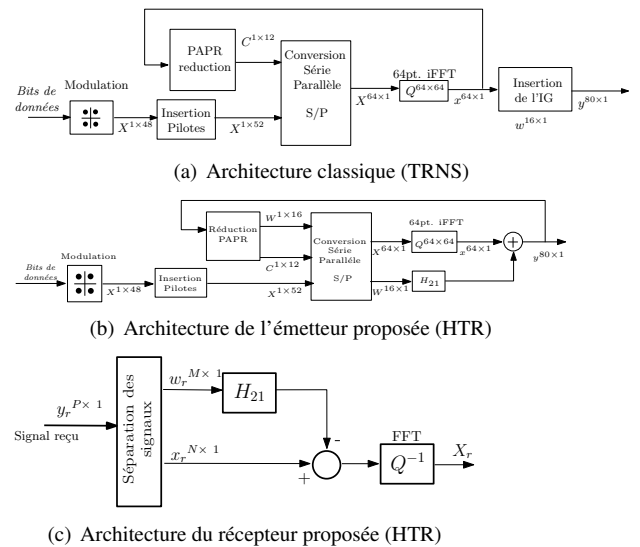


Figure 2. HTR appliquée au standard IEEE 802.11a

Sur la figure 2.(b), le signal de correction est généré à partir de la combinaison des SPN (vecteur  $C$ ) et de l'IG (vecteur  $W$ ) contrairement à la méthode TRNS présentée sur

la figure 2.(a) qui génère le signal de correction à partir des SPN uniquement.

Lorsque les techniques CP ou ZP sont utilisées, aucune modification du signal reçu n'est nécessaire pour la méthode TRNS, cependant l'utilisation de l'intervalle de garde dans la méthode HTR comme présenté à l'équation (4) impose des modifications de l'architecture du récepteur comme proposée sur la figure 2.(c). En effet, le signal de l'intervalle de garde est utilisé pour décoder le signal reçu tel que :

$$X_r = Q^{-1} \cdot (x_r - H_{21} \cdot w_r) \quad (9)$$

où  $x_r$  et  $w_r$  représentent respectivement les signaux de données et de l'intervalle de garde reçus dans le domaine temporel,  $H_{21}$  représente la matrice pseudo-aléatoire utilisée pour l'insertion de l'IG dans le processus de réduction du PAPR.

### 2.e. Processus d'optimisation

Une comparaison de plusieurs algorithmes appliqués au problème non-linéaire présenté à l'équation (8) a été proposée dans [4] [5]. Elle montre l'intérêt du choix de l'algorithme d'optimisation et la nécessité d'envisager d'autres algorithmes que le Gradient classique. Ici, nous allons utiliser l'algorithme de Marquardt-Levenberg car il offre un bon compromis complexité/vitesse de convergence. Le processus itératif de cet algorithme initialise le vecteur de correction  $c_0$  et effectue une mise à jour comme suit :

$$c_{i+1} = c_i - [J''_i + \mu \cdot I_P]^{-1} \cdot J'_i \quad (10)$$

avec  $i$  le numéro de l'itération,  $I_P$  la matrice identité de taille  $P \times P$ .  $\mu$  représente le coefficient de réglage de la direction de recherche.  $J'_i = [\frac{\partial y_i}{\partial c}]_{c=c_i}$  et  $J''_i = [\frac{\partial^2 y_i}{\partial c^2}]_{c=c_i}$  représentent respectivement le Gradient et le Hessien du critère  $J$  au point  $c = c_i$ .

## 3. Résultats de simulation

Pour évaluer les performances de la méthode HTR, nous avons réalisé des simulations dans le cas du standard WLAN-IEEE 802.11a avec comme canaux de transmission un canal gaussien (AWGN) et un canal multi-trajets de Rayleigh. Le Tableau 1 présente les paramètres du canal radio mobile 802.11a utilisé au cours des simulations.

Index du trajet (k)	0	1	2	3
Delai du trajet (ns)	0	5	10	15
Gain du trajet (dB)	-0.15	-14.63	-29.11	-43.58

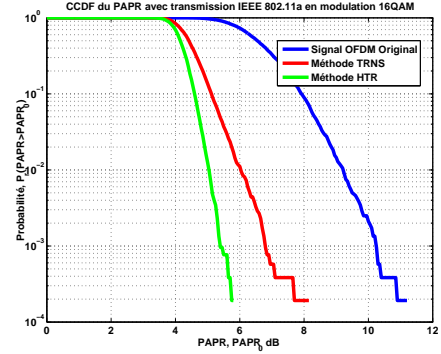
**Tableau 1. Paramètres du canal de Rayleigh utilisé**

### 3.a. Gain de reduction du PAPR

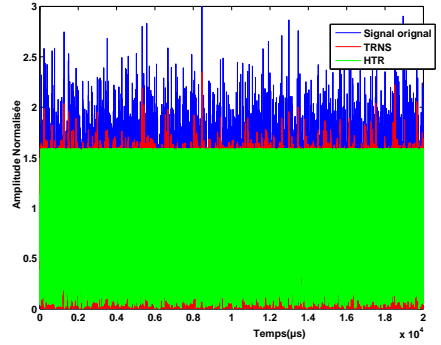
La CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function) désigne la probabilité que le PAPR soit supérieur à une valeur  $PAPR_0$  donnée tel que :

$$CCDF(PAPR_0) = P_r(PAPR > PAPR_0) \quad (11)$$

où  $P_r(\cdot)$  désigne la fonction de probabilité.



(a) CCDF après 20 itérations



(b) Signal temporel

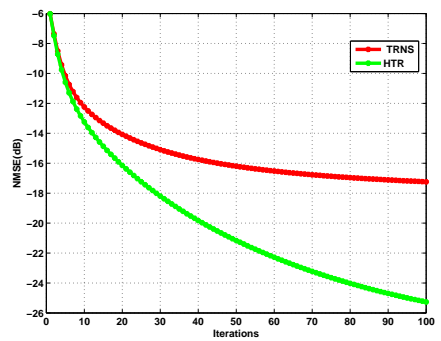
**Figure 3. Gain de réduction du PAPR**

La figure 3.(a) montre que la méthode HTR permet d'atteindre un gain en réduction du PAPR de 5 dB pour une CCDF de  $10^{-3}$ , comparé à un gain de 3 dB obtenu en utilisant la méthode TRNS. De même, la figure 3.(b) montre qu'en termes de nombre de pics réduits, la méthode HTR est plus performante.

### 3.b. Vitesse de convergence

La minimisation de l'erreur quadratique moyenne définie par la NMSE (Normalised Mean Square Error) permet d'évaluer la vitesse de convergence en terme de rapidité de convergence de l'algorithme proposé.

$$NMSE_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left( \sum_{|y_i + c_i| > A} \frac{(|y_i + c_i| - A)^2}{A^2} \right) \quad (12)$$



**Figure 4. Convergence des deux algorithmes**

En effet, l'objectif de l'algorithme est de réduire la valeur du NMSE à chaque itération afin d'atteindre une valeur minimale après un nombre d'itérations aussi faible que possible. Comme le montre la figure 4, l'algorithme

de Marquardt-Levenberg appliqué sur le même symbole en utilisant les méthodes TRNS et HTR ne convergent pas vers la même valeur. Ceci est dû à l'inclusion de l'IG dans le signal de correction. En effet, au bout de 50 itérations, la méthode HTR permet une amélioration du NMSE d'environ 15 dB comparé à la méthode TRNS qui permet une amélioration de 10 dB. On peut donc conclure que pour minimiser l'erreur quadratique moyenne, la méthode HTR est beaucoup plus rapide.

### 3.c. Qualité de transmission

L'utilisation de l'IG à la réception peut avoir des conséquences sur la qualité du signal reçu, particulièrement lors de la transmission sur un canal multi-trajets. Afin d'évaluer l'impact de l'IG sur la qualité de transmission, nous avons comparé les performances des méthodes HTR et TRNS en termes de taux d'erreurs binaire, mesuré par le TEB et de distortion introduite sur la constellation du signal reçu, mesurée par l'EVM (Error Vector Magnitude).

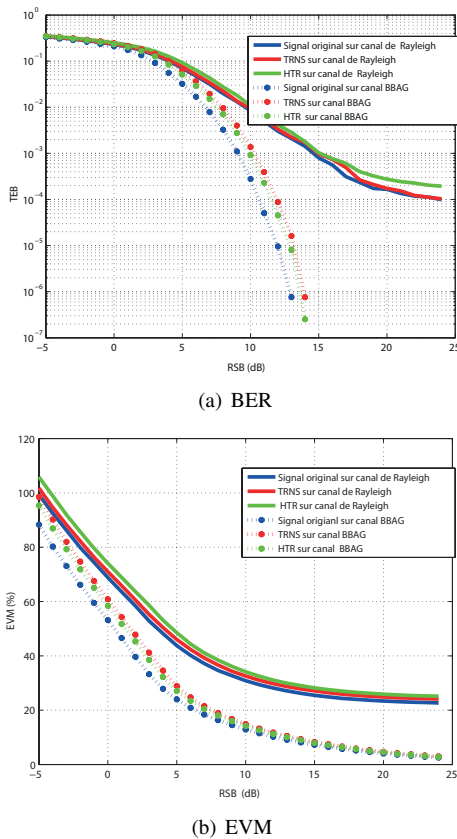


Figure 5. Qualité de transmission

La figure 5.(a) montre que les performances des deux méthodes sont comparables en sortie d'un canal BBAG (Bruit Blanc Additif Gaussien). Par contre, sur un canal multi-trajets de Rayleigh, la méthode HTR est comparable à la méthode TRNS pour un Rapport Signal à Bruit (RSB) inférieur ou égal à 15 dB. Au delà, l'impact de l'utilisation de l'IG en présence d'un canal multitrajets sur la qualité de transmission devient plus évident car le bruit blanc devient négligeable devant la distortion introduite par l'IG. En terme d'EVM, les résultats restent comparables. On peut donc conclure que la méthode HTR permet une amélioration du PAPR tout en maintenant une bonne qualité

de service.

### 3.d. Analyse spectrale

Le calcul de la densité spectrale de puissance montre que l'utilisation de l'IG n'affecte pas le spectre du signal émis comme le montre la figure 6. De plus, le masque spectral du standard est bien respecté.

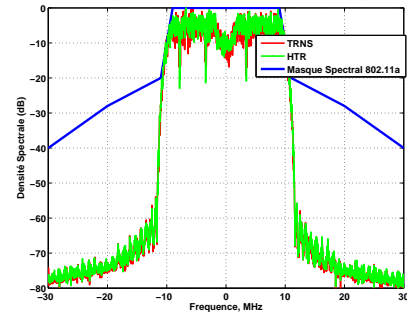


Figure 6. Comparaison des spectres

## 4. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle technique (HTR) permettant d'améliorer la méthode TRNS pour une meilleure réduction du PAPR dans les systèmes OFDM. De même, de nouvelles architectures de l'émetteur et du récepteur ont été proposées avec de légères modifications permettant de prendre en compte l'intervalle de garde dans le processus de réduction du PAPR. La comparaison des performances a montré que la méthode HTR permet d'améliorer le gain de réduction du PAPR d'environ 2 dB. En termes de qualité de transmission (TEB, EVM, Spectre), les deux méthodes sont comparables. Ces résultats fournis par la méthode HTR permettront d'utiliser un amplificateur à haut niveau de puissance et donc avec un rendement plus élevé, ou un amplificateur à plus faible consommation électrique afin d'améliorer le bilan énergétique.

## Références

- [1] A. More and S. Somani, "The reduction of papr in ofdm systems using clipping and slm method," in *Information Communication and Embedded Systems (ICICES), 2013 International Conference on*, Feb 2013, pp. 593–597.
- [2] Y. Louet and J. Palicot, "A classification of methods for efficient power amplification of signals," *annals of telecommunications*, vol. 63, pp. 351–368, 2008.
- [3] J. Tellado and J. Cioffi, "Efficient algorithms for reducing PAR in multicarrier systems," in *Information Theory, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Symposium on*, Aug 1998, pp. 191–.
- [4] B. Koussa, S. Bachir, C. Perrine, C. Duvanaud, and R. Vauzelle, "A comparison of several gradient based optimization algorithms for PAPR Reduction in OFDM Systems," in *The 2nd IEEE International conference, CCCA.*, 2012.
- [5] R. Schoenberg, "Optimization with the Quasi-Newton Method," Sept 2001.